干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

# 黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征

沙国良[1,2,3]， 魏天兴[1,2,3]， 陈宇轩[1,2,3]， 傅彦超[1,2,3]， 任 康[1,2,3]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治国家林业局重点实验室，北京 100083；3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083）

**摘 要**：为探究黄土高原丘陵区不同植物群落的土壤粒径分布特征。选取草地、山杏纯林、油松纯林和油松山杏混交林0~200 cm土壤为研究对象，采用激光衍射技术测定土壤样品粒度组成，计算土壤粒度参数与分形维数，绘制粒度频率曲线。结果表明：（1）研究区土壤属粉壤土，粉粒含量约占总体的56.58%~71.67%，砂粒约占21.37%~38.71%，黏粒约占3.55%~6.96%。（2）各植物群落内土壤粒度组成随土层深度增加分布较为均一，粒径分布整体分选性均较差，呈极正偏度，峰态尖窄，粒度频率曲线为双峰型，曲线波峰一致。不同植物群落土壤粒径分布差异主要集中在土壤表层0~20 cm（$P<0.05$）。（3）草地、山杏纯林、油松纯林和油松山杏混交林0~200 cm土壤平均分形维数分别为2.63、2.60、2.61、2.58。分形维数与黏粒含量具有极显著正相关关系（$P<0.05$），其中，草地土壤分形维数与黏粒的相关性最强。总体来看，黄土高原丘陵区草地土壤粒径分布特征显著优于人工林，本研究结果可为黄土高原的生态重建工作提供理论依据。

**关 键 词**：人工林；土壤粒径分布；粒度参数；分形维数；黄土高原
**文章编号**：

土壤粒径分布特征是土壤最基本的物理属性，与土壤的水分运动、肥力发展和孔隙状况等有着密切关联[1-3]，在地表侵蚀过程中起着重要作用。其中，土壤黏粒因其具备胶体性质，可有效促进土壤团聚体的形成，进而提升土壤结构的稳定性，增强其抗侵蚀能力[4-5]。相关研究表明，采用传统结构描述的方法并不能充分反映土壤粒径的分布特性，而分形理论可以实现土壤结构组成的定量描述，更加准确地表达土壤的结构形态和功能、整体与局部的相似性[6]，逐步成为研究土壤粒径分布的有效途径。

黄土高原作为典型的黄土堆积区，在其独特气候条件和长达数千年的人为活动影响下，植被破坏严重，土壤侵蚀强烈，是世界上最严重的水土流失区之一。黄土高原大部分地区的土壤侵蚀模数超过1000 t·km$^{-2}$·a$^{-1}$，其中，丘陵沟壑区的土壤侵蚀尤为剧烈，侵蚀模数超过5000 t·km$^{-2}$·a$^{-1}$[7]。为治理水土流失，保护生态环境，该地区先后实施了一系列生态修复工程，并取得了巨大成就。截止目前，黄土高原的植被覆盖程度提升显著，入黄泥沙含量和土壤流失状况得以减缓[8-12]。油松（*Pinus tabulaeformis*）、山杏（*Armeniaca sibirica*）作为黄土高原的主要造林树种，具有适应性强、抗瘠薄、耐寒旱等特性[13]。然而，大面积的油松、山杏纯林种植会导致林分结构单一，林内生态系统稳定性弱，抗干扰能力差，土壤质量受限，影响林下植被生长等问题[14-15]。此类问题在黄土高原的水蚀风蚀交错区尤为突出，对此，国内外专家学者已围绕水土流失动态监测、土壤侵蚀和土壤养分计量特征等领域开展了大量研究工作[16-20]，而针对不同林分配置模式下土壤粒径垂直分异的研究较为少见。

本研究选取油松纯林、山杏纯林、油松山杏混交林为研究对象，草地作为对照，利用激光衍射技术测定了不同植物群落0~200 cm土壤的粒度组成，计算了土壤的粒度参数和分形维数，并绘制了土壤

**收稿日期**：2021-10-20； **修订日期**：2022-01-17
**基金项目**：国家生态系统观测研究网络运行服务项目（2019-2020）；“十三五”国家重点研发计划项目课题（2016YFC0501705）资助
**作者简介**：沙国良（1997-），男，硕士研究生，主要从事植被恢复等方面研究. E-mail: sgl2020@bjfu.edu.cn
**通讯作者**：魏天兴（1969-），男，博士，教授，主要从事流域自然地理过程、生态修复等方面研究. E-mail: weitx@bjfu.edu.cn

粒配曲线，以期深入了解不同林分配置对土壤粒径垂直分布特征的影响，为黄土高原的生态重建工作提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市吴起县(107°39′~108°33′E，36°33′~37°24′N)，属温带大陆性季风气候，年均降水量483.4 mm，降水集中在夏秋两季，多为暴雨，年均气温7.8 ℃，年日照时数2435.7 h，≥10 ℃积温2883 ℃[21]，海拔1222~1812 m，无霜期达146 d，土壤为黄绵土，土层深厚。研究区属典型黄土丘陵沟壑区，水土流失严重，自1999年退耕还林实施后，形成了以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松、柠条绵鸡儿(*Caragana korshinskii*)和山杏等为主的人工植被群落[22]。样地基本信息见表1。

### 1.2 土壤样品采集与处理

于2020年9月在研究区内选取20 m×20 m草地、油松林、山杏林和油松山杏混交林样地，为保证相对独立性，样地空间距离大于1 km，每个样地内部采用五点取样法，表层土0~20 cm每10 cm取样，20~200 cm每20 cm采集土壤样品，共计11个土层，各土层重复采样3次作为重复试验，同层土壤样品混合均匀后封装。经风干处理后，过2 mm筛，去除砾石和植物细根，预处理土样使用$H_2O_2$去除有机质，HCl去除碳酸盐后，使用Mastersizer 3000激光粒度分析仪测定土壤粒度组成，每个样品重复测量3次，采用美国制土壤粒级分级标准输出结果[23]，并输出粒径体积分布下5%、16%、25%、50%、75%、84%和95%累计值对应的土壤粒径(μm)。

### 1.3 分形维数的计算

土壤由不同大小土粒组成，具有孔隙结构，本身具有自相似性和非均一性，因此分形理论已广泛应用于土壤科学用以描述土壤的结构和功能[24]。土壤分形维数不仅可以反映土壤粒度分布的整体性特征还与土壤质地和土壤肥力等土壤属性具有相关性[25]。本文采用土壤颗粒体积分形模型对单重分形维数进行计算[26]，计算公式如下：

$$\frac{V(r<R_i)}{V_T}=\left(\frac{R_i}{R_{max}}\right)^{3-D} \tag{1}$$

式中：$V(r<R_i)$为土壤粒径中小于$R_i$的体积分数；$r$为土壤粒径(mm)；$R_i$为粒径分区中第$i$等级的粒径；$V_T$为土壤颗粒总体积；$R_{max}$为土壤粒径中的最大值(mm)；$D$为分形维数。

### 1.4 土壤粒度特征参数的计算

将实验测定的土壤颗粒体积分布数据，根据Udden-Wenworth粒级标准，采用Krumdein对数转换法将粒径真值$d$转换为$\Phi$，中值粒径使用Krumbeinn法计算，平均粒径、标准偏差、偏度值和峰态值采用Folk-Word图解法计算。土壤粒度特征参数用以反映土壤粒度分布趋势、离散程度、分布形态[27]。

计算公式如下：

$$\Phi=-\log_2 d \tag{2}$$

$$d_m=\Phi_{50} \tag{3}$$

$$d_0=\frac{1}{3}(\Phi_{16}+\Phi_{50}+\Phi_{84}) \tag{4}$$

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of the sampling plots

| 样地 | 林龄/a | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 主要植被 | 郁闭度 | 林下草本盖度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 草地 | – | 1376.9 | 半阳坡 | 33 | – | – | 胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、赖草(*Leymus secalinus*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等 | – | 0.87 |
| 山杏纯林 | 20 | 1459.7 | 阳坡 | 21 | 10.60 | 7.40 | 山杏(*Armeniaca sibirica*)、赖草、柴胡(*Bupleurum chinensis*)、长芒草、早熟禾(*Poa annua*)等 | 0.58 | 0.35 |
| 油松纯林 | 20 | 1362.6 | 半阳坡 | 20 | 13.85 | 9.80 | 油松(*Pinus tabulaeformis*)、长芒草、早熟禾、红柴胡(*Bupleurum scorzonerifolium*)、碱菀(*Tripolium vulgare*)等 | 0.69 | 0.45 |
| 油松山杏混交林 | 20 | 1373.4 | 阴坡 | 18 | 12.90 | 9.30 | 山杏、油松、胡枝子、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、长芒草等 | 0.70 | 0.37 |

注：–表示无数据。

$$\sigma_0=\frac{1}{4}\left(\Phi_{84}-\Phi_{16}\right)+\frac{1}{6.6}\left(\Phi_{95}-\Phi_5\right) \tag{5}$$

$$S_0=\frac{\Phi_{16}+\Phi_{84}-2\Phi_{50}}{2\left(\Phi_{84}-\Phi_{16}\right)}+\frac{\Phi_5+\Phi_{95}-2\Phi_{50}}{2\left(\Phi_{95}-\Phi_5\right)} \tag{6}$$

$$K_0=\frac{\Phi_{95}-\Phi_5}{2.44\left(\Phi_{75}-\Phi_{25}\right)} \tag{7}$$

式中：$d$为土壤粒径(mm)；$d_m$为中值粒径；$d_0$为平均粒径；$\sigma_0$为标准偏差；$S_0$为偏态值；$K_0$为峰态值。$\Phi_5$、$\Phi_{16}$、$\Phi_{25}$、$\Phi_{50}$、$\Phi_{75}$、$\Phi_{84}$、$\Phi_{95}$为累积频率曲线中对应百分位下粒径的$\Phi$值。

### 1.5 统计分析方法

采用IBM SPSS Statistics 25进行K-S检验验证数据正态性，单因素方差分析(One-way ANOVO)用来比较不同林地类型下的土壤粒度组成和粒度参数差异，经方差齐性检验后使用最小显著性差异法(LSD)进行显著性检验。使用R 3.6.3进行线性回归，分析分形维数与各粒级含量之间的关系，并使用Origin 2019b绘制土壤粒度频率曲线。

## 2 结果与分析

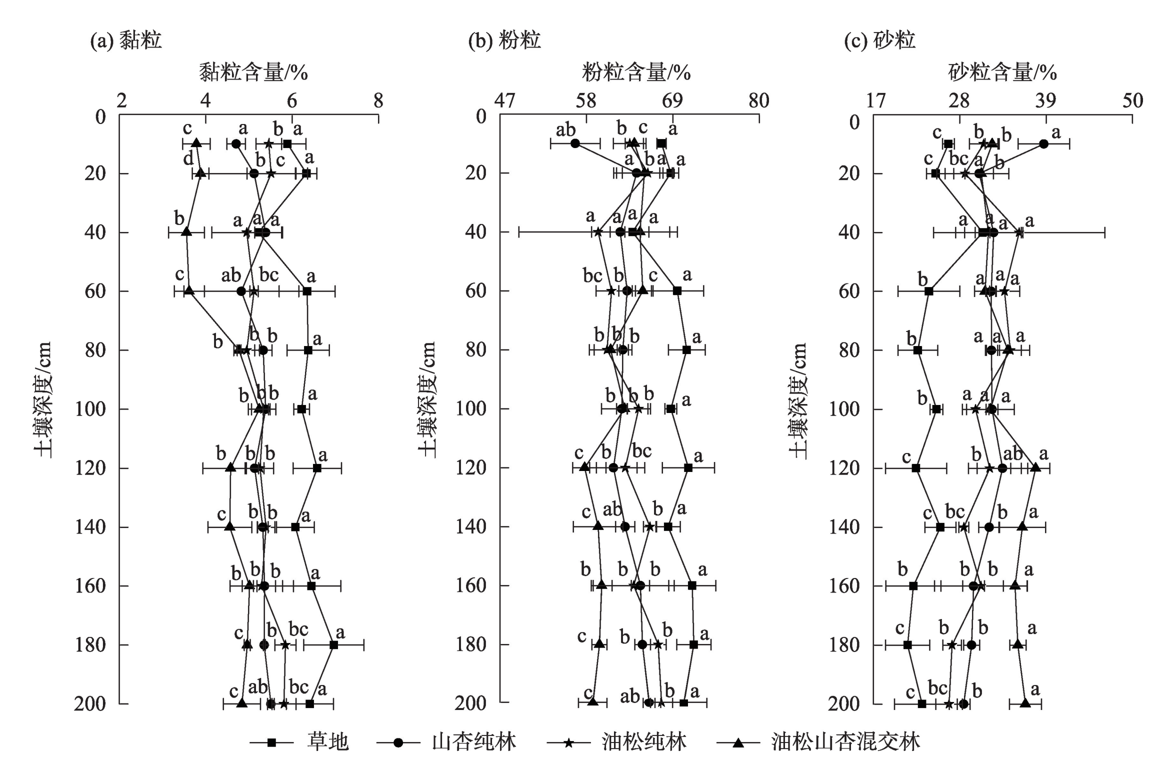
### 2.1 土壤粒度组成

如图1所示，研究区土壤(0~200 cm)属粉壤土，不同植物群落下土壤的粒度组成按体积占比排序均为粉粒>砂粒>黏粒。其中粉粒含量为56.58%~71.67%，砂粒含量为21.37%~38.71%，黏粒含量最少为3.55%~6.96%。

除个别土层外，0~200 cm草地黏粒、粉粒含量显著高于油松纯林、山杏纯林和油松山杏混交林($P<0.05$)，砂粒含量均显著小于油松纯林、山杏纯林、油松山杏混交林($P<0.05$)。山杏纯林和油松纯林除0~10 cm、10~20 cm土层外，黏粒、粉粒、砂粒含量均不存在显著差异($P>0.05$)。油松山杏混交林黏粒含量显著小于其他林地($P<0.05$)，砂粒显著大于草地、油松纯林和山杏纯林($P<0.05$)。深度达到100 cm后混交林粉粒含量显著小于纯林和草地($P<0.05$)。

### 2.2 粒度参数与分形维数

如图2所示，研究区土壤平均粒径为$\Phi$4.97~5.50，中值粒径范围在$\Phi$4.66~5.22，土壤颗粒集中分布在较粗范围内。显著性分析表明，除10~20 cm、20~40 cm土层外，草地平均粒径均显著大于油松山杏混交林、油松纯林和山杏纯林($P<0.05$)，10~100 cm混交林与纯林平均粒径与中值粒径差异不显著($P>0.05$)，100~200 cm(除140~160 cm土层外)混交




注：同一土壤深度下不同小写字母表示不同植被粒级含量差异显著。

图1 不同植物群落0~200 cm土壤粒度组成

Fig. 1 Particle size composition of 0−200 cm soil under different plant communities

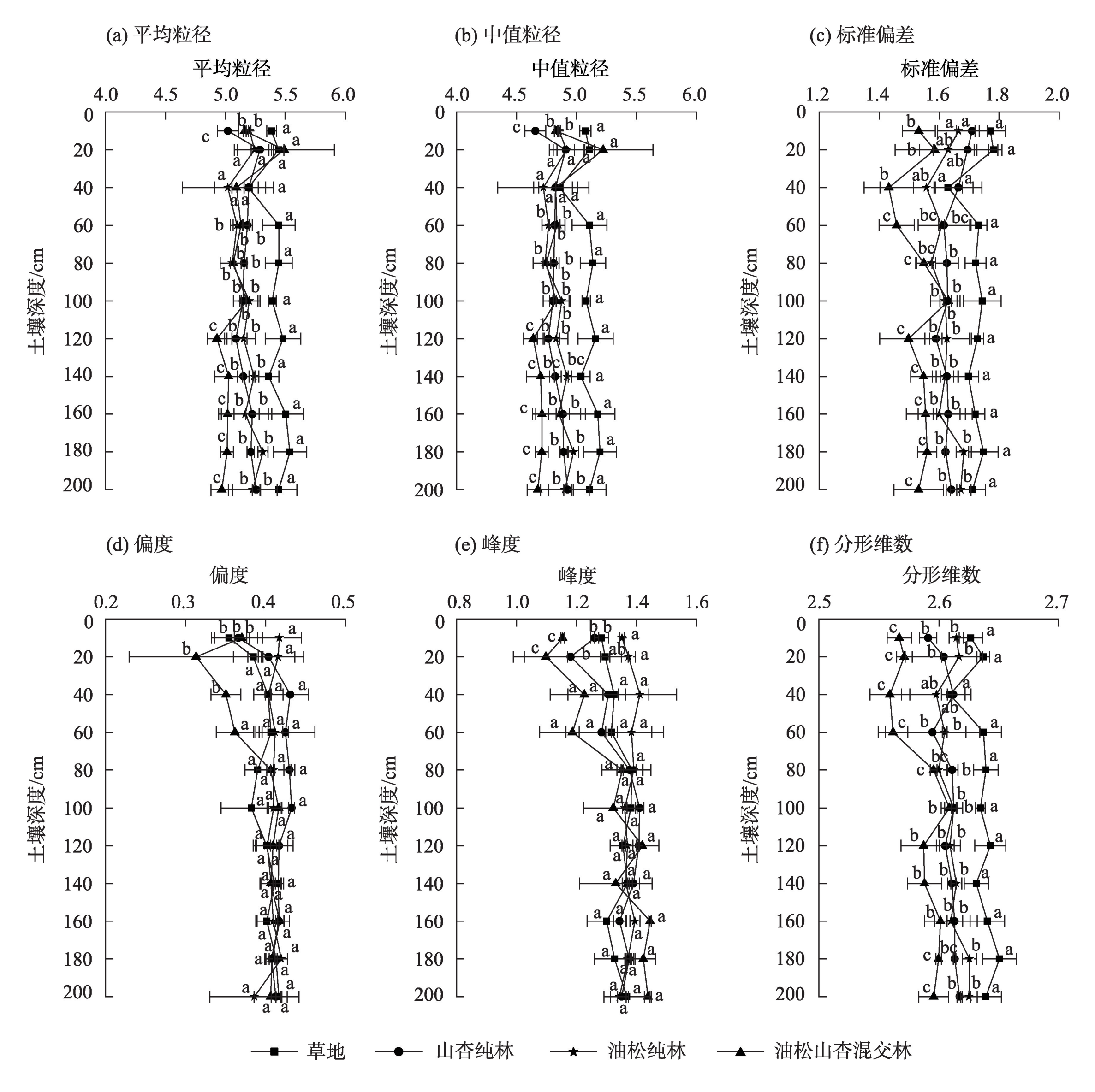



图2 不同植物群落土壤粒度参数

Fig. 2 Soil particle size parameters of different plant communities

林平均粒径与中值粒径显著小于纯林($P<0.05$)，10~200 cm山杏纯林与油松纯林平均粒径与中值粒径差异不显著($P>0.05$)。

草地、山杏纯林、油松纯林和油松山杏混交林，标准偏差范围分别为$\Phi$1.70~1.75、$\Phi$1.60~1.71、$\Phi$1.55~1.67和$\Phi$1.43~1.58，平均标准偏差草地>山杏纯林>油松纯林>油松山杏混交林，土壤颗粒分选性等级均属较差级。显著性分析表明，40~200 cm草地标准偏差显著大于其他林地($P<0.05$)，山杏纯林与油松纯林标准偏差差异不显著($P>0.05$)。10~100 cm混交林标准偏差与纯林无显著差异($P>0.05$)，100~200 cm混交林标准偏差显著小于纯林和草地($P<0.05$)。

草地、山杏纯林、油松纯林和油松山杏混交林，偏度范围分别为$\Phi$0.35~0.42、$\Phi$0.37~0.43、$\Phi$0.38~0.42、$\Phi$0.31~0.42内，土壤粒度粗细分配对称性差，呈极正偏态。峰度范围在1.10~1.44，属尖窄水平，土壤颗粒分布集中。显著性分析表明，0~20 cm混交林偏度和峰度均显著小于草地和纯林($P<0.05$)，20~200 cm各样地土壤偏度和峰度都不存在显著差异($P>0.05$)。

草地、山杏纯林、油松纯林和油松山杏混交林，平均分形维数为2.63、2.60、2.61、2.58。显著性分析表明0~200 cm草地分形维数显著大于纯林和混交林($P<0.05$)，10~200 cm山杏纯林与油松纯林分形维数差异不显著($P>0.05$)，0~60 cm混交林分形维

数显著小于纯林和草地，80~100 cm混交林分形维数与纯林和草地无显著差异($P>0.05$)。

### 2.3 土壤粒径与分形维数的相关性

由表2可知，各林地分形维数与黏粒含量具有极显著正相关关系($P<0.01$)，拟合优度($R^2$)草地>油松山杏混交林>山杏纯林>油松纯林。草地和油松纯林的分形维数与粉粒含量具有极显著正相关关系($P<0.01$)，而油松山杏混交林分形维数与粉粒含量呈显著负相关关系($P<0.05$)，山杏纯林分形维数与粉粒含量无显著相关性($P>0.05$)。草地和纯林的分形维数与砂粒含量具有极显著负相关关系($P<0.05$)，油松山杏混交林分形维数与砂粒含量无显著相关性($P>0.05$)。

### 2.4 土壤粒度频率分布曲线

如图3所示，除山杏纯林0~10 cm属三峰型，研究区不同植物群落0~200 cm土壤粒度频率曲线均属于双峰型，形态相似，曲线第一波峰均约为$\Phi$10.50处取得，第一波峰平均峰值大小排序为草地>

表2 土壤分形维数与粒级含量相关性

Tab. 2 Correlation between soil fractal dimension and particle size content

| 粒级 | 样地 | 回归方程 | $R^2$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|
| 黏粒 | 草地 | $y$=0.0231$x$+2.4906 | 0.999 | 0.00 |
| | 山杏纯林 | $y$=0.0288$x$+2.4571 | 0.986 | 0.00 |
| | 油松纯林 | $y$=0.0299$x$+2.4524 | 0.977 | 0.00 |
| | 油松山杏混交林 | $y$=0.0289$x$+2.4569 | 0.989 | 0.00 |
| 粉粒 | 草地 | $y$=0.0044$x$+2.3312 | 0.842 | 0.00 |
| | 山杏纯林 | $y$=0.0011$x$+2.5368 | 0.041 | 0.22 |
| | 油松纯林 | $y$=0.0029$x$+2.4239 | 0.756 | 0.00 |
| | 油松山杏纯林 | $y$=−0.0023$x$+2.7296 | 0.142 | 0.02 |
| 砂粒 | 草地 | $y$=−0.0038$x$+2.7283 | 0.894 | 0.00 |
| | 山杏纯林 | $y$=−0.0019$x$+2.6684 | 0.124 | 0.03 |
| | 油松纯林 | $y$=−0.0028$x$+2.6974 | 0.807 | 0.00 |
| | 油松山杏混交林 | $y$=0.0015$x$+2.5364 | 0.025 | 0.18 |

注：$y$为分形维数；$x$为样地对应的粒级含量；$R^2$为拟合优度；$P$为统计显著性。

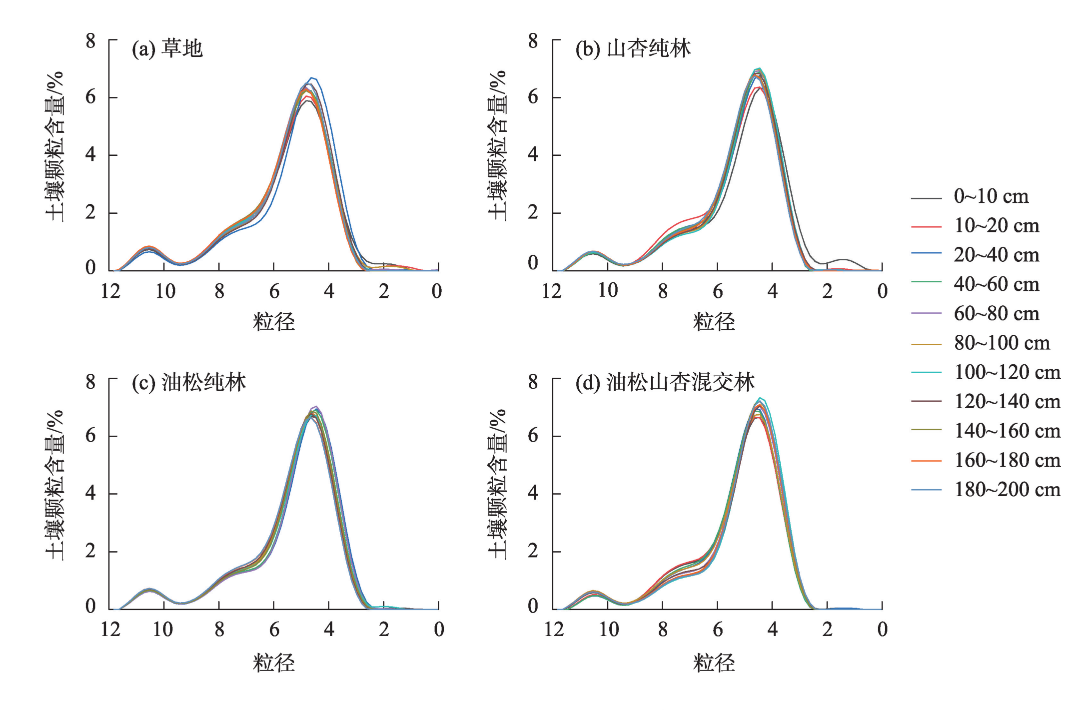



图3 不同植物群落土壤粒度频率分布曲线

Fig. 3 Frequency distribution curve of soil particle size in different plant communities

油松纯林>山杏纯林>油松山杏混交林，第二波峰均约在$\Phi$4.50附近出现，第二波峰平均峰值大小排序为油松山杏混交林>油松纯林>山杏纯林>草地。随深度增加，土壤粒度频率曲线变化集中在$\Phi$7.90~8.00和$\Phi$4.00~5.00。

## 3 讨论

### 3.1 不同植物群落对土壤粒度组成的影响

土壤粒度组成是由外部环境要素（降水量、气温、地形、坡度等）与植被-土壤系统的内部要素（植被根系分泌物、枯落物、土壤微生物等）共同作用的结果，不同植物群落的土壤粒度组成反映了其生境差异[28]。研究区土壤（0~200 cm）粉粒含量最高，砂粒含量居中，黏粒含量最少，这主要与黄土的风成沉积过程有关，在此基础上不同植物群落的土壤粒度组成差异可归因于强烈的土壤侵蚀作用[29]。黄土高原水蚀风蚀作用强烈，强集中性降雨使土壤表层粗颗粒迅速风化崩解，细粒部分随入渗作用进入深层，或随地表径流流失[30]。在各土层深度上，草地土壤各粒级含量均显著区别于人工林，黏粒、粉粒含量显著大于人工林，砂粒含量小于人工林，与Xia等[31]的研究结果一致，表明草地对土壤的细化作用强于人工林。土壤黏粒含量与团聚体稳定性呈正相关[32]，本研究中草地土壤较高的黏粒含量将会促进稳定性团聚体的形成，增强土壤抗蚀能力[33]，有利于水土保持。此外，退耕还林在一定年限内没有显著改善土壤粒度组成，造林树种的选择在黄土高原土壤质地改良上的作用可能存在过分高估的现象[34]，而退耕还林还草，采用林草复合生态系统，可以增强植被-土壤生态系统稳定性，并提高土壤养分和持水性同时优化土壤结构[35]，是控制黄土高原水土流失的有效措施。

土壤细颗粒与土壤水分和有机碳稳定性均具有显著相关性，黄土高原人工林生长受限于降水条件，为补充水分，植物根系向深层不断发展，在根系垂直增殖过程中，土壤砂粒含量多可调节水分渗透和向上毛细提升过程，使植物更好地从地下补充水分[36]。同时，在退耕还林过程中，土壤有机碳稳定性下降[37]，使得土壤细粒含量下降，人工林地细粒组分少于草地。但随着林龄的增长，植被对土壤粒度的影响逐渐明显，土壤黏粒、粉粒含量将不断增加，砂粒含量将不断减少，成熟林阶段土壤粒度组成将达到最佳水平[38]。此外，植物根系也对土壤粒度组成具有重要影响[39]，植物根系通过物理缠绕、串联网络和分泌根系分泌物等方式提高了土壤抗蚀能力，阻碍了土壤颗粒转化[40]。相关研究表明提高林下草本盖度可有效增强土壤抗冲性，林下草本根系主要分布在0~20 cm土层，因此极大程度固定了表层土壤，减少了细粒的流失[41]。而在20~40 cm土层，随着草本根系分布的减少出现了土粒粗化的现象。本文中油松纯林和山杏纯林在不同土层土壤粒径差异不显著，这是因为山杏和油松作为耐旱树种，在根系结构和空间分布上具有相似性[42]。混交林由于根系发达，分布广泛，根系作用放大，使得土壤粒度组成偏粗，有助于植被吸水，缓解生理性干旱。

### 3.2 不同植物群落下土壤粒度参数的差异

研究区土壤平均粒径为$\Phi$4.97~5.50，中值粒径为$\Phi$4.66~5.22，土壤颗粒组成较细。偏度呈极正偏度，峰态尖窄，这是因为土壤粉粒含量极高，而黏粒含量极低，且砂粒中极细砂占比达70%，因此造成了粒度分布极不对称和波峰集中的现象[43]。标准偏差反映了土壤颗粒分散程度，研究区土壤分选性较差，而混交林的分选性显著优于纯林和草地，表明混交林可使土壤颗粒整体集中分布在某一区间，体现了其在改变土壤粒度组成方面的性能，与前人研究成果吻合[44]。同时不同树种间的混交将对土壤理化性质产生重要影响[45]，因此针对混交林对土壤改良作用的研究有待进一步深入。

土壤粒度参数差异主要集中在0~20 cm，这与杜满义等[46]的研究结果一致。表层土壤中大量的植物凋落物、浅根系统及土壤生物体残留，可经微生物分解形成腐殖质，促进土壤养分的转化，增强土壤呼吸[47]，进而影响土壤的粒度组成，本研究中土壤粒度参数随深度增加变化不显著，这与前人的研究结果基本一致[48]，土壤粒度组成受到成土母质的强烈影响，会继承母质的一般特性[49]，研究区的主要成土母质为第四纪黄土，土壤发育于同一母质，因此剖面粒度组成较为均一。此外，表层土壤由于受到植物根系影响在种植、耕作等作用下熟化，初步发育形成黄绵土[50]，而深层土壤受植被影响较小，其粒度组成仍由黄土母质沉积过程中物源、搬运条件、沉积环境及沉积后的风化作用决定[51]。

### 3.3 粒级含量与分形维数的关系

相关性分析结果表明，分形维数与土壤黏粒含

量呈极显著正相关,而不同植物群落分形维数与土壤粉粒、砂粒含量的相关性不同。这与董莉丽等[52]的研究结果不一致,可能是由于选取树种不同造成的,但也有研究表明分形维数与黏粒含量相关性最强,而与粉粒、砂粒相关性弱[53],由此可见对于分形维数与粒级含量间的关系仍需进一步研究。平均分形维数草地>油松纯林>山杏纯林>油松山杏混交林,本文中混交林分形维数小于纯林,直接原因在于黏粒含量少,混交林的垂直根系分布广泛可以改变土壤密度和土壤孔隙度增强土壤呼吸[54],土壤呼吸强度与气温在一定范围内呈正相关[55],进而对土壤粒度组成产生重要影响。

本研究表明不同植物群落土壤分形维数与粒级含量的拟合存在差异,这与前人的研究结果一致[56-57]。草地各粒级含量拟合的效果均优于人工林,因此,分形维数在不同植物群落中具有不同的适用性,且对草地描述效果更好。对于黏粒含量稀少的土壤使用分形维数,描述土壤粒径分布特征和结构时,分形维数的适用性应进一步研究。

### 3.4 土壤粒度频率曲线变化

研究区不同植物群落相似的土壤粒度频率曲线,源自于样地临近所导致的风沙搬运沉积的一致性[57]。0~200 cm土层,土壤粒度频率曲线的变化主要集中在$\Phi$4.00~5.00和$\Phi$7.90~8.00,推测该区间为土壤细粒在垂直方向上的移动适宜区间。同时,不同植物群落土壤粒度频率曲线峰值均处于$\Phi$4.00~5.00区间范围内,且峰值大小表现为油松山杏混交林>油松纯林>山杏纯林>草地,表明混交林土壤颗粒分布更集中,土壤组成更均匀。此外,相关研究表明0~60 cm是受植物影响较大的土层[58]。0~10 cm土层,不同植物群落的土壤粒度频率曲线差异最大,曲线在$\Phi$7.96~10.00区间范围内高度重合,而在其余区间范围存在显著差异。10~20 cm,土壤粒径分布差异主要集中在$\Phi$3.35~5.19和$\Phi$5.56~8.69。20~60 cm,土壤粒径分布差异主要集中在$\Phi$4.27~4.82、$\Phi$6.11~8.32和$\Phi$9.79~11.27。综上,植物根系对$\Phi$4.00~5.00、$\Phi$6.00~8.00和$\Phi$10.00~12.00区间的土壤颗粒影响更强,调节作用更显著。

## 4 结 论

(1) 研究区土壤属粉壤土,粉粒含量约占总体的56.58%~71.67%,砂粒含量21.37%~38.71%,黏粒含量占3.55%~6.96%;各植物群落土壤粒径分布呈极正偏度,峰态尖窄,分选性均较差,平均分形维数介于2.58~2.63,其中,草地土壤粒径分布特征优于人工林。

(2) 研究区不同植物群落土壤粒度频率曲线呈相似分布,粒径分布差异主要集中在土壤表层(0~20 cm),随土壤深度增加,土壤粒度组成变化不显著。

(3) 土壤分形维数与黏粒含量呈显著正相关,不同植物群落土壤分形维数与粒级含量的关系存在差异,分形维数与草地粒级含量相关性最高,表明分形理论可以更好地揭示草地土壤的粒径分布特征。

## 参考文献(References)


[1] Mohammadi M H, Meskini-Vishkaee F. Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 70-80.

[2] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J]. Science China Technology Sciences, 2011, 54: 1568-1574.

[3] Paz-Ferreiro J, Vázquez E V, Miranda J G V. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters [J]. Geoderma, 2010, 160(1): 47-56.

[4] 曾全超, 李娅芸, 刘雷, 等. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J]. 草地学报, 2014, 22(4): 743-749. [Zeng Quanchao, Li Yayun, Liu Lei, et al. Study on soil aggregate stability and soil erodibility in the grassland vegetation of the Loess Plateau region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(4): 743-749. ]

[5] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 806-815. [Wang Peijiang, Dai Quanhou, Ding Guijie, et al. Variation of soil anti-erodibility during restoration of degraded Karst vegetation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 806-815. ]

[6] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.

[7] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409. [Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409. ]

[8] Hua F, Wang X, Zheng X, et al. Opportunities for biodiversity gains under the world's largest reforestation program[J]. Nature Communication, 2016, 7: 12717, doi: 10.1038/ncomms12717.

[9] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272–278. [Peng Wenying, Zhang Keli, Chen Yao, et al. Research on soil quality change after returning farmland to forest on Loess loping croplands[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 272–278. ]

[10] 黄艳丽, 李占斌, 苏辉, 等. 黄土高原不同生态治理小流域土壤有机质、容重及黏粒含量的对比[J]. 应用生态报, 2019, 30(2): 370–378. [Huang Yanli, Li Zhanbin, Su Hui, et al. Comparison of soil organic matter, bulk density and clay content in small watersheds under different ecological managements of Loess Plateau, China[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 370–378. ]

[11] 杨灿, 魏天兴, 李亦然, 等. 黄土高原典型县域植被覆盖度时空变化及地形分异特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1830–1838. [Yang Can, Wei Tianxing, Li Yiran, et al. Temporal and spatial variations of fractional vegetation cover and topographic differentiation characteristics in typical counties of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1830–1838. ]

[12] Yu H W, Brandt M, Zhao M F, et al. Do afforestation projects increase core forests? Evidence from the Chinese Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106558, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106558.

[13] 刘增文, 段而军, 刘卓玛姐, 等. 黄土高原半干旱丘陵区不同树种纯林土壤性质极化研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1110–1120. [Liu Zengwen, Duan Erjun, Liu Zhuomajie, et al. Soil polarization under pure stands of different tree varieties in semi-arid hilly areas of the Loess Plateau[J]. Acta Pedological Sinica, 2009, 46(6): 1110–1120. ]

[14] 李浩, 胡婵娟, 冯德显, 等. 半干旱黄土丘陵区退化人工林群落结构调整下细根特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1523–1533. [Li Hao, Hu Chanjuan, Feng Dexian, et al. Fine root characteristics of degraded artificial forest under community structure adjustment in semiarid loess hilly region[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1523–1533. ]

[15] 刘青柏, 刘明国, 王玉涛, 等. 不同林型立地土壤水分性状及其持水能力的比较[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 775–779. [Liu Qingbo, Liu Mingguo, Wang Yutao, et al. Comparison of soil water properties and soil water storage capacity in different forest habitats[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 775–779. ]

[16] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近50年黄土高原水土流失的时空变化[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1129–1139. [Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Yu Xinxiao. Temporal and spatial variability of sediment yield on the Loess Plateau in the past 50 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1129–1139. ]

[17] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Multifractal characteristics of particle size distributions (50–200 m) in soils in the vadose zone on the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104786, doi: 10.1016/j.still.2020.104786.

[18] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2988–2996. [Li Ting, Deng Qiang, Yuan Zhiyou, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2988–2996. ]

[19] 胡雅, 张露, 刘金宝. 黄土丘陵沟壑区沟道土壤养分分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊2): 85–88. [Hu Ya, Zhang Lu, Liu Jinbao. Distribution characteristics of soil nutrients in loess hilly and gully area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Suppl. 2): 85–88. ]

[20] Martin W, Livia U, Eleanor H, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149–162.

[21] 许智超, 张岩, 朱清科, 等. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析——以陕西吴起县为例[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 91–96. [Xu Zhichao, Zhang Yan, Zhu Qingke, et al. Vegetation restoration since the project of returning cropland to forest in the semiarid Loess Plateau: A case study of Wuqi County, Shaanxi Province[J]. Ecology and Environment, 2011, 20(1): 91–96. ]

[22] Chen Y X, Wei T X, Sha G L, et al. Soil enzyme activities of typical plant communities after vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 170: 104292, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104292.

[23] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 四种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6): 1060–1068. [Gao Guanglei, Ding Guodong, Zhao Yuanyuan, et al. Effects of soil particle size classification system on calculating volume-based fractal dimension[J]. Journal of Basic Science and Engingeering, 2014, 22(6): 1060–1068. ]

[24] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 等. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 221–228. [Zhang Jiarui, Wang Jinman, Zhu Yucheng, et al. Application of fractal theory on pedology: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 221–228. ]

[25] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081–3089. [Wang De, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3081–3089. ]

[26] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896–1899. [Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896–1899. ]

[27] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 54–60. [Lu Lianzhan, Shi Zhengtao. Analysis for sediment grain size parameters of connotation sand

calculation method[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 54–60. ]

[28] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 1957: 108–115. [Huang Changyong, Xu Jianming. Soil science[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 1957: 108–115. ]

[29] 袁杰, 曹生奎, 曹广超, 等. 祁连山南坡不同植被类型土壤粒度特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 76–82. [Yuan Jie, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Soil particle size characteristics under different vegetation types on southern slope of Qilian Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 76–82. ]

[30] 脱登峰, 许明祥, 郑世清, 等. 黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3281–3287. [Tuo Dengfeng, Xu Mingxiang, Zheng Shiqing, et al. Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3281–3287. ]

[31] Xia Y, Zhou W J, Chen Y P, et al. Spatial variation of soil properties and carbon under different land use types on the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134946, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134946.

[32] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5067–5077. [Tang Jun, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5067–5077. ]

[33] 李程程, 曾全超, 贾培龙, 等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2039–2048. [Li Chengcheng, Zeng Quanchao, Jia Peilong, et al. Characteristics of soil aggregate stability and corrosion resistance longitude change in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (6): 2039–2048. ]

[34] 李少华, 王学全, 包岩峰, 等. 不同类型植被对高寒沙区土壤改良效果的差异分析[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 60–64. [Li Shaohua, Wang Xuequan, Bao Yanfeng, et al. Variability of soil properties under different vegetation plots in alpine sandy land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 60–64. ]

[35] 张雷一, 张静茹, 刘方, 等. 林草复合系统的生态效益[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1789–1797. [Zhang Leiyi, Zhang Jingru, Liu Fang, et al. A review of ecological benefits of silvopasture systems[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(9): 1789–1797. ]

[36] Fan Y, Miguez-Macho G, Jackson R, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States, 2017, 114(40): 10572–10577.

[37] Lü M K, Noormets A, Ukonmaanaho L, et al. Stability of soil organic carbon during forest conversion is more sensitive in deep soil than in topsoil in subtropical forests[J]. Pedobiologia, 2021, 84: 105716, doi: 10.1016/j.pedobi.2020.150706.

[38] 陈宇轩, 高广磊, 张英, 等. 呼伦贝尔沙地风沙土粒径分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 124–130. [Chen Yuxuan, Gao Guanglei, Zhang Ying, et al. Particle size distribution of aeolian soils in Hulun Buir Sandy Land, Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 124–130. ]

[39] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙地中间锦鸡儿人工林根系分布及林下土壤特性研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 840–846. [Zhang Liheng, Li Qingxue, Wang Xuequan, et al. Root distribution and soil properties under *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 840–846. ]

[40] Wang J, Zhao W W, Wang G, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China)[J]. Science of the Total Environment, 2021, 770: 144833, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144833.

[41] 王雅琼, 张建军, 李梁, 等. 祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 122–131. [Wang Yaqiong, Zhang Jianjun, Li Liang, et al. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 122–131. ]

[42] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 96–99, 107. [Zhao Zhong, Li Peng. Researches on vertical root distributions and drought resistance of main planting tree species in Weibei Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 96–99, 107. ]

[43] 陈宇轩, 张飞岳, 高广磊, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1051–1058. [Chen Yuxuan, Zhang Feiyue, Gao Guanglei, et al. Soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1051–1058. ]

[44] 刘小娥, 苏世平, 李毅, 等. 黄土高原地区人工林营造-混交林模式生态效益研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 380–391. [Liu Xiao'e, Su Shiping, Li Yi, et al. Study on the ecological benefits of a plantation mixed forest model in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 380–391. ]

[45] 刘欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 735–743. [Liu Xin, Peng Daoli, Qiu Xincai. Differences in soil physicochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Journal of Applied Environmental Biology, 2018, 24(4): 735–743. ]

[46] 杜满义, 张连金, 裴顺祥, 等. 不同类型油松混交林土壤物理特性[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3588–3595. [Du Manyi, Zhang Lianjin, Pei Shunxiang, et al. Soil physical characteristics in different types of *Pinus tabuliformis* mixed forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3588–3595. ]

[47] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 19–26. [Liu Shaohui, Fang Jingyun.

Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 19–26. ]

[48] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Particle size distribution of soils (0–500 cm) in the Loess Plateau, China[J]. Geoderma Regional, 2016, 7(3): 251–258.

[49] 孙佳佳, 王培, 王志刚, 等. 不同成土母质及土地利用对红壤机械组成的影响[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 54–58. [Sun Jijia, Wang Pei, Wang Zhigang, et al. Impact of parent material and land use type on mechanical composition of red soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(3): 54–58. ]

[50] 吕国华, 李小强, 白文波, 等. 半湿润与半干旱区黄绵土冬小麦农田土壤剖面特征研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1033–1037. [Lü Guohua, Li Xiaoqiang, Bai Wenbo, et al. Loessal soil profile properties of winter wheat field in semi-humid and semi-arid zones [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1033–1037. ]

[51] 宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 597–603. [Song Jie, Chun Xi, Bai Xuemei, et al. Review of grain size analysis in China desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 597–603. ]

[52] 董莉丽, 马孝燕, 胡丹, 等. 吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 111–115. [Dong Lili, Ma Xiaoyan, Hu Dan, et al. Monofractal and multifractal characteristics of soil particle size distribution in sample sites of grain for green in Wuqi County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 111–115. ]

[53] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4625–4632. [Zhao Mingyue, Zhao Wenwu, Liu Yuanxin. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: A case study in the loess hilly-gully area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4625–4632. ]

[54] 郭琦, 王新杰. 不同混交模式杉木人工林林下植被生物量与土壤物理性质研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 70–74. [Guo Qi, Wang Xinjie. Undergrowth biomass and soil physical properties under *Cunninghamia lanceolata* with different patterns of mixed forests[J]. Journal of Central South University of Forestry Technology, 2014, 34(5): 70–74. ]

[55] 谢育利, 陈云明, 唐亚坤, 等. 地表凋落物对油松、沙棘人工林土壤呼吸的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 52–61. [Xie Yuli, Chen Yunming, Tang Yakun, et al. Impact of aboveground litterfall on soil respiration in the *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* plantations[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 52–61. ]

[56] 童春元, 李钢铁, 卢立娜, 等. 杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 308–315. [Tong Chunyuan, Li Gangtie, Lu Lina, et al. Distribution of soil size and fractal characteristics under low-efficiency poplar forests[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 308–315. ]

[57] 邱捷, 王洪德, 郑一鹏, 等. 海涂围垦区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(5): 882–888. [Qiu Jie, Wang Hongde, Zheng Yipeng, et al. Fractal features of soil particles under different land uses in a coastal reclamation area[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(5): 882–888. ]

[58] 魏晨辉, 沈光, 裴忠雪, 等. 不同植物种植对松嫩平原盐碱地土壤理化性质与细根生长的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(5): 759–764. [Wei Chenhui, Shen Guang, Pei Zhongxue, et al. Effects of different plants cultivation on soil physical-chemical properties and fine root growth in saline-alkaline soil in Songnen Plain, northeastern China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(5): 759–764. ]

# Characteristics of soil particle size distribution of typical plant communities on the hilly areas of Loess Plateau

SHA Guoliang[1,2,3], WEI Tianxing[1,2,3], CHEN Yuxuan[1,2,3], FU Yanchao[1,2,3], REN Kang[1,2,3]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN/CFERN, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Soil particle size distribution (PSD), a basic soil physical property, is highly related to soil structure, water movement, fertility development, porosity condition, and soil-forming process and has been widely studied as an indicator of soil erosion in different plant communities. Generally, soil PSD comprises different layers of clay, silt, and sand. Among these layers, clay has the colloidal property that can effectively promote the formation and development of soil aggregates, enhance the stability of soil structure, and strengthen soil erosion resistance. Previous studies on the Loess Plateau of China only focused on the soil PSD in the upper soil layers, but the vertical variation in soil PSD in the deep layers is unknown. Additionally, planting large areas of pure forests leads to problems such as a single stand structure, weak stability of the intraforest ecosystem, poor resistance to disturbance, and restricted soil quality, all of which affect the sustainability of vegetation restoration. In the present work, soil samples (0−200 cm) from grassland, *Pinus tabuliformis* pure forests, *Armeniaca sibirica* pure forests, *Pinus tabuliformis* and *Armeniaca sibirica* mixed plantations were collected to examine the effects of different forest allocations on the vertical variation in soil PSD and provide a theoretical basis for the ecological reconstruction efforts work on the Loess Plateau. First, soil PSD was measured through laser diffraction technique. Then, soil particle size parameters (mean particle size, median particle size, standard deviation, and skewness and kurtosis values) and frequency distribution curve were calculated and analyzed. Finally, the fractal theory was applied to accurately express the soil structural form and function. Results showed that (1) the soils in the study area belonged to silty loam. The soil PSD of different plant communities was dominated by silt accounting for 56.58%−71.67% followed by sand accounting for 21.37%−38.71% and clay accounting for 3.55%−6.96%. (2) The soil PSD of different plant communities, which were primarily affected by parent material, showed uniformity along the soil depth. Generally, the soil PSD of different plant communities reflected poor sorting, positive skewness, and sharp kurtosis. The frequency curves showed two peaks. Significant difference in PSD was only found at the soil surface (0−20 cm). (3) The soil average fractal dimension (0−200 cm) of grassland, *Pinus tabuliformis* pure forests, *Armeniaca sibirica* pure forests, and mixed plantations of *Pinus tabuliformis* and *Armeniaca sibirica* were 2.63, 2.60, 2.61, and 2.58, respectively. Soil fractal dimension, which was positively correlated with clay content, could accurately reflect the soil particle composition in grass land. Moreover, grassland in the Wuqi County had finer soil PSD than plantations.

**Key words:** plantations; particle size distribution; particle size parameters; fractal dimension; Loess Plateau